

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

|                   |                                                                                                                                                     |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 論題(和文)            | 履歴ダンパーを有する超高層弾性架構の実効変形比に着目した制振性能評価                                                                                                                  |
| Title             | EVALUATION OF THE VIBRATION CONTROL PERFORMANCE FOR HIGH-RISE ELASTIC FRAME WITH HYSTERETIC DAMPERS FOCUSING ON EFFECTIVE DAMPER DEFORMATION RATION |
| 著者(和文)            | 古谷慶, 添田幸平, 佐藤大樹, 北村春幸, 石井正人, 吉江慶祐, 宮崎充, 佐々木和彦, 岩崎雄一                                                                                                 |
| Authors           | Kohei Soeta, Daiki Sato, Haruyuki Kitamura, Masato Ishii, Keisuke Yoshie, Mitsuru MIYAZAKI, Kazuhiko SASAKI, IWASAKI Yuichi                         |
| 出典 / Citation     | 構造工学論文集, Vol. 58B, , pp. 197-207                                                                                                                    |
| Citation(English) | , Vol. 58B, , pp. 197-207                                                                                                                           |
| 発行日 / Pub. date   | 2012, 3                                                                                                                                             |
| rights            | 日本建築学会                                                                                                                                              |
| rights            | 本文データは学協会の許諾に基づきCiNiiから複製したものである                                                                                                                    |
| relation          | isVersionOf: <a href="http://ci.nii.ac.jp/naid/110009706520">http://ci.nii.ac.jp/naid/110009706520</a>                                              |

## 履歴ダンパーを有する超高層弾性架構の実効変形比に着目した制振性能評価

## EVALUATION OF THE VIBRATION CONTROL PERFORMANCE FOR HIGH-RISE ELASTIC FRAME WITH HYSTERETIC DAMPERS FOCUSING ON EFFECTIVE DAMPER DEFORMATION RATION

古谷 慶\*, 添田 幸平\*, 佐藤 大樹\*\*, 北村 春幸\*\*\*, 石井 正人\*\*\*\*  
 吉江 慶祐\*\*\*\*, 宮崎 充\*\*\*\*, 佐々木 和彦\*\*\*\*, 岩崎 雄一\*\*\*\*  
*Kei FURUYA, Kohei SOETA, Daiki SATO, Haruyuki KITAMURA, Masato ISHII*  
*Keisuke YOSHIE, Mituru MIYAZAKI, Kazuhiko SASAKI and Yuichi IWASAKI*

Damping effects are affected by frame, allocation of damper, and so on. In practical design, it takes time to obtain optimal configuration for a lot of dynamic response analysis. This study aims at evaluating damping effects for only static analysis. A series of dynamic or static analysis are conducted for typical steel high-rise buildings (thirty story buildings). Furthermore, three types of frame models varied stiffness and four kinds of damper configuration patterns are used. The results show that damping effects are affected by configuration patterns. This response can be grasped by effective damper deformation ration. This paper proposes new performance index that can be evaluated damping effects in place of effective damper deformation ration, and shows its usefulness.

**Keywords :** *High-rise building, Passively controlled structure, Hysteretic damper, Dynamic response analysis, Static analysis, Effective damper deformation ration*

超高層建物, 制振構造, 履歴ダンパー, 動的解析, 静的解析, 実効変形比

## 1. はじめに

制振構造は地震時における建物の損傷を制御するものとして、高層建物だけでなく中低層建物など幅広く適用されている。多種多様な制振構造が開発・施工されている一方で、設計した制振部材が要求性能を十分に満たすものなのか不明確な部分があることも実情である<sup>1)</sup>。それら制振部材を取り付けた建物の地震時における制振効果に、対象建物の架構性状や制振部材の平面・高さ方向の配置形式、各層への制振部材の投入量、入力地震動などが影響することは多くの時刻歴応答解析の検討によって明らかとなっている<sup>2-9)</sup>。このように影響因子が多い制振部材を実設計に用いる場合には、建物ごとパラメトリックに多くの解析を行い、最適な制振部材の配置や投入量などを決断する必要がある。しかし、多層建物に繰り返し時刻歴応答解析を行うには多くの検討時間が要いられる。そのため、時刻歴応答解析を行う以前に検討範囲を絞り、少ない検討回数で有効な設置状況を判断出来る方法が必要である。

制振部材の配置や投入量を決断する上で、構造体の各層に生じる層間変形（せん断変形と曲げ変形の和）のうち制振部材に有効に働く変形成分（せん断変形）との層間変形に対する割合（以後、実効変形比と呼ぶ）を多く確保することが重要となる。本論文で対象とする超高層建物は変動軸力による柱の軸伸縮によって全体曲げ変形が発生する。また、制振部材は意匠上の制約から平面的に限られた同一位置に連層配置することが多いため、制振部材が大きな力を負

担することで周辺架構に柱の軸伸縮による曲げ変形を誘発する<sup>9)</sup>。その曲げ変形が層間変形の多くを占めるほど、実効変形比は小さい値をとる。ゆえに、超高層建物において、高い制振効果を得るためには実効変形比をより大きく確保する必要がある。

本研究では、時刻歴応答解析することなく、有効な制振部材の配置形式および投入量の判断を行える評価指標の提案を目標とする。そこで本論文では、制振部材の設置状況の違いが応答性状へ与える影響を把握すると共に、その傾向を静的解析のみから捉えられる評価指標の構築を目的とする。具体的には、超高層建物に制振部材である履歴ダンパーを設置し、ダンパーの投入量、架構剛性およびダンパーの平面方向の配置形式をパラメータとした時刻歴応答解析を行う。次に、石井・笠井<sup>7)</sup>による静的解析のみから得られる「骨組特性値」に着目した評価指標の構築を行い、その評価指標で制振効果の評価を行えるのかについて検証する。

以下に、本論文の構成を述べる。2 章では、検討対象建物概要、そのモデル化および入力地震動について示す。3 章では、ダンパーの投入量、架構剛性およびダンパーの平面方向の配置形式が制振効果に与える影響について時刻歴応答解析を用いた応答結果から把握を行う。4 章では、骨組特性値の概要を簡潔に示し、本論文で提案する評価指標の算出方法を示す。提案する評価指標と時刻歴応答解析結果から算出したものを比較し、その精度の検証を行う。また、提案する評価指標と応答値の対応関係を検討すると共に、ダンパー

\* 東京理科大学大学院理工学研究科 大学院生

\*\* 東京理科大学理工学部建築学科 助教・博士（工学）

\*\*\* 東京理科大学理工学部建築学科 教授・博士（工学）

\*\*\*\* (株) 日建設計構造設計室 博士（工学）

\*\*\*\*\* オイレス工業（株）

Graduate Student, Faculty of Science and Eng., Tokyo Univ. of Science

Assistant Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Science and Eng., Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Science and Eng., Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng.

Nikken Sekkei Ltd, Dr. Eng.

Oiles Corporation.

の投入量の最適値を予測する方法の検討を行う。5章では、履歴ダンパーの降伏せん断力比分布の提案を行う。提案する分布と地震層せん断力係数の分布係数(Ai分布)に基づく設計用層せん断力比分布を比較し、その有用性について示す。

## 2. 検討対象建物概要および入力地震動

本論文で検討に用いる超高層建物の平面図と軸組図を図1に示す。主架構は、100m級の超高層建物を想定し、純ラーメン架構の地上30階(高さが約120m)の鋼構造とする。階高は1階のみが5.5m、他の階が4mであり、平面形状は各階同一とする。主架構は、ダンパーによる応答低減効果を期待し、1つのモデルを基準とし部材断面を小さく、弾性1次固有周期 $T_1$ を長くした剛性の異なる3種類を用いる。各架構の部材断面、 $T_1$ および建物総重量(鉄骨重量)を表1に、層剛性 $K_f$ の高さ方向分布を図2に示す。主架構のみでの $T_1$ が建物高さ $H(=121.5\text{ m})$ に対して $T_1=0.030H$ ,  $0.037H$ ,  $0.044H$ となることから、各架構の表記名は30H, 37H, 44Hとする。図2より、30H, 37H, 44Hの順に架構の剛性が低減していることが確認出来る。解析はX方向への一方向入力とし、剛床を仮定した3次元立体部材モデルで行う。柱梁は剛域、弾性域および中央部材によって構成され、軸力と2軸曲げの相関を考慮出来るように、中央部材端にMSモデルが断面形状に合わせて配置されている。中央部材には、2軸せん断が考慮される。立体部材接合部は、接合部長さを等価な剛域としてモデル化している<sup>8)</sup>。主架構(中央部材)は弾性とする。構造減衰は架構の $T_1$ に対して $\delta=2\%$ となる剛性比例型とする。

制振部材は、Y2およびY3通りに配置する(図1)。図3に示すよ

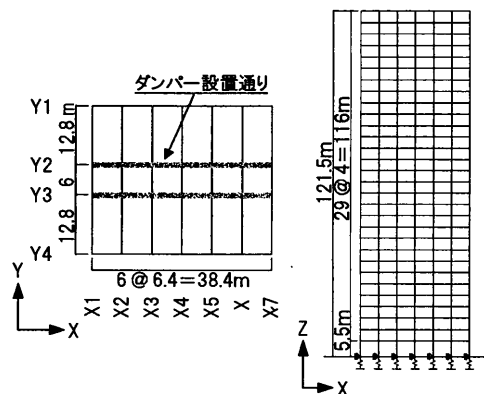


図1 平面図と軸組図(Y2, 3通り)

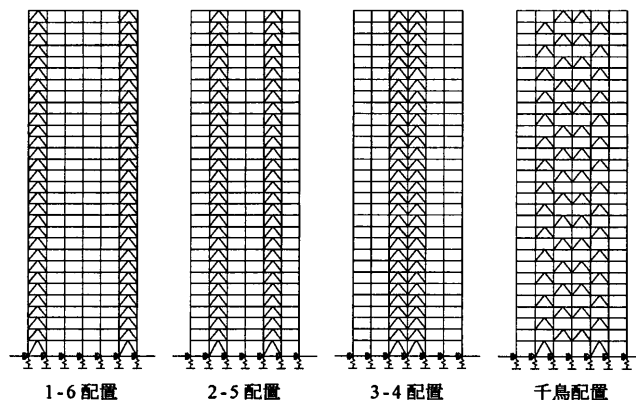


図3 ダンパーの配置形式

|     | 部材断面                                   | $T_1$<br>(s) | 建物総重量<br>(鉄骨重量)<br>(kN) |
|-----|----------------------------------------|--------------|-------------------------|
| 30H | 内柱 □-600×600×19 ~ □-600×600×45         | 3.55         | 259712<br>(43087)       |
|     | 外柱 □-600×600×19 ~ □-600×600×45         |              |                         |
|     | 大梁 WH-850×200×16×19 ~ WH-850×300×16×25 |              |                         |
| 37H | 内柱 □-600×600×22 ~ □-600×600×50         | 4.47         | 253238<br>(38639)       |
|     | 外柱 □-550×550×22 ~ □-550×550×50         |              |                         |
|     | 大梁 WH-600×200×12×19 ~ WH-600×250×12×25 |              |                         |
| 44H | 内柱 □-550×550×22 ~ □-550×550×45         | 5.36         | 247056<br>(33451)       |
|     | 外柱 □-500×500×19 ~ □-500×500×45         |              |                         |
|     | 大梁 WH-500×200×12×16 ~ WH-500×250×12×22 |              |                         |

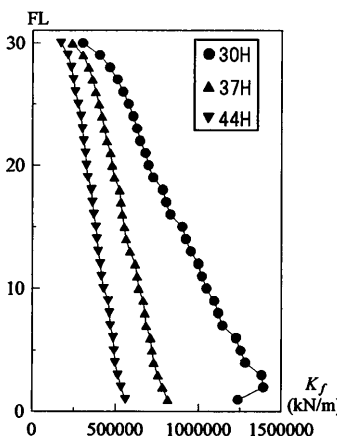


図2 各架構の層剛性

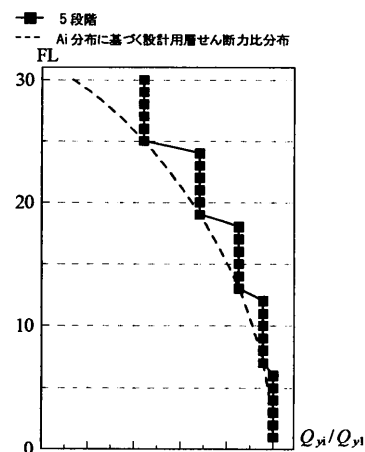


図4 ダンパーの降伏せん断力比分布

うに、平面・高さ方向の配置形式は連層配置の3種類および千鳥配置の1種類の計4種類とする。制振部材として設置する履歴ダンパーには、降伏応力度 $225\text{ N/mm}^2$ の座屈拘束型ブレースを用いる。本論文では履歴ダンパーの投入量として第1層のダンパーの降伏せん断力係数 $\alpha_{y1}$ を用いる((1)式)。 $\alpha_{y1}$ によって、第1層のダンパーの降伏せん断力 $Q_{y1}$ が定まる。

$$Q_{y1} = \alpha_{y1} \sum_{i=1}^N m_i g \quad (1)$$

ここで、 $g$ :重力加速度、 $m_i$ : $i$ 層の質量、 $\sum m_i g$ :建物総重量(表1)である。

図1, 3に示すように1層当り、8基のダンパーを設置すると、(1)式のせん断力が作用した時のダンパー1基当りの軸方向での降伏耐力 $N_{y1}$ は(2)式となる。

$$N_{y1} = \frac{Q_{y1}}{8 \cos \theta_1} \quad (2)$$

ここで、 $\theta_1$ :第1層のダンパーの取り付け角度である。ダンパーの降伏応力度を $\sigma_y$ 、断面積を $A_1$ とすると、 $\sigma_y = N_{y1}/A_1$ の関係式および(1)、(2)式より(3)式が得られる。

$$A_1 = \frac{N_{y1}}{\sigma_y} = \frac{\alpha_{y1}}{8 \sigma_y \cos \theta_1} \sum_{i=1}^N m_i g \quad (3)$$

本論文の履歴ダンパーの復元力特性は完全弾塑性復元力特性とし、1次剛性 $K_{d1}$ は(4)式より得られる。

$$K_{d1} = \frac{AE}{L'} \quad (4)$$

ここで、 $A$ :ダンパーの断面積、 $E$ :鋼材のヤング係数、 $L'$ :ダンパ

一の塑性化部長さ ( $L = L/3$  (付録 1)),  $L$ : ダンパーの全長である。  
第 1 層以上の  $i$  層のダンパーの投入量  $d\alpha_{yi}$  は、図 4 の地震層せん断力係数の分布係数 ( $A_i$  分布) に基づく設計用層せん断力比分布に従い、(5) 式のように定める。図 4 の横軸は第 1 層のダンパーの降伏せん断力  $Q_{y1}$  に対する  $i$  層のダンパーの降伏せん断力  $Q_{yi}$  の比率である。3 章で用いるダンパーの降伏せん断力比分布には、図 4 に示すように 5 段階の分布を用いる。

$$d\alpha_{yi} = d\alpha_{y1} \frac{Q_{yi}}{Q_{y1}} \quad (5)$$

以上の方法により、各層のダンパーの設計を行う。

本論では、建物周期のばらつきに対する影響の少ない解放工学的基盤における告示波を用いることにし、その位相特性として、設計で用いられていることが多い HACHINOHE 1968 EW を採用し、長周期領域で速度応答スペクトルが減衰定数  $h = 5\%$  で概ね  $0.8 \text{ m/s}$  となる模擬地震動波形とする。図 5 に入力地震動の加速度時刻歴波形を、図 6(a), (b) に、速度応答スペクトル  $S_v(h = 5\%)$  およびエネルギースペクトル  $V_E(h = 10\%)$  を示す。

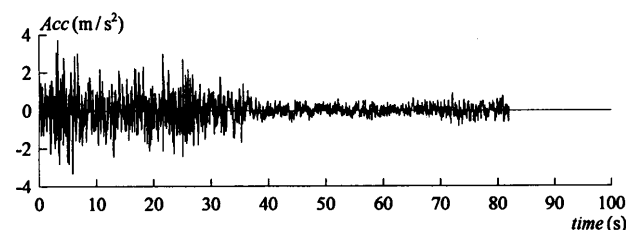


図 5 入力地震動の加速度時刻歴波形

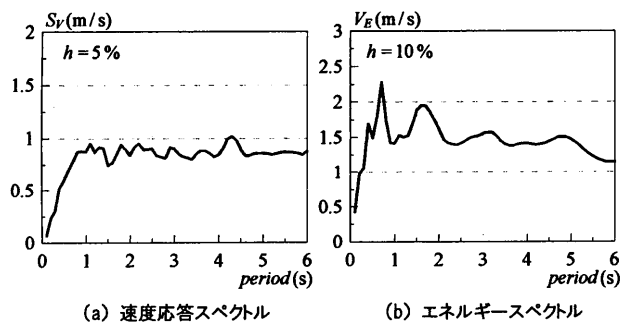


図 6 入力地震動のスペクトル

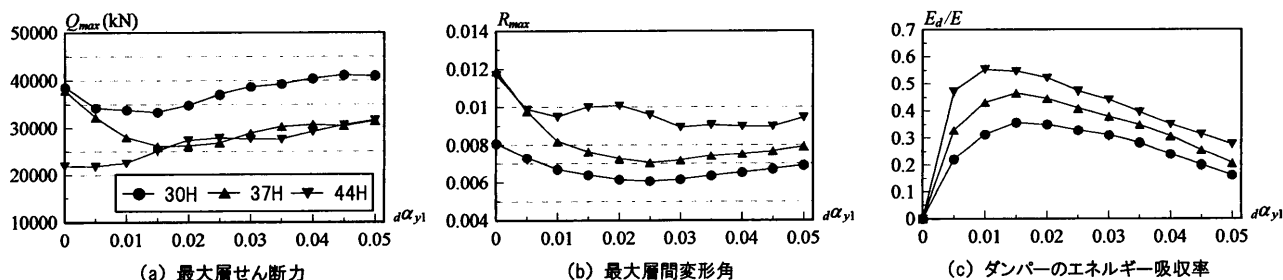


図 7 ダンパー量の違いによる応答変化 - 架構別 (2-5 配置) -

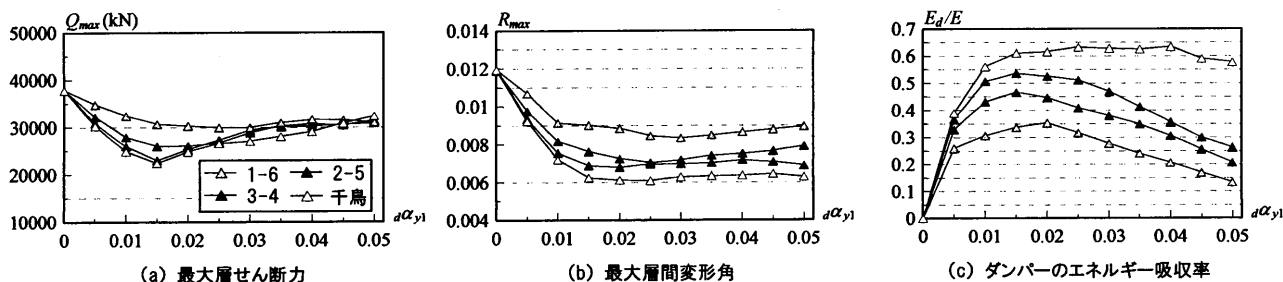


図 8 ダンパー量の違いによる応答変化 - 配置形式別 (37H) -

### 3. ダンパーの設置状況が応答性状に与える影響について

#### 3.1 ダンパー量の違いによる応答変化

建物の地震時の応答をダンパーで制御を行う際、投入するダンパー量は応答低減に影響するものとして重要な検討項目である。本節では、3 種類の架構および 4 種類の配置形式を対象として、 $d\alpha_{y1}$  をパラメータとした時の応答変化について検討を行う。

図 7, 8 に、横軸に  $d\alpha_{y1}$  をとり、 $d\alpha_{y1} = 0 \sim 0.05$  まで変化させた時の架構別および配置形式別の応答値の変化を示す。ここで用いる評価指標には、層せん断力、層間変形角の最大値  $Q_{max}$ ,  $R_{max}$  および入力エネルギー  $E$  に対する全ダンパーのエネルギー吸収量  $E_d$  の比率  $E_d/E$  を示す。なお、 $d\alpha_{y1} = 0$  は主架構のみ (非制振) での結果である。図 7 に、2-5 配置における架構別の結果を示す。図 7(a) ~ (c) より、 $Q_{max}$ ,  $R_{max}$  および  $E_d/E$  は、投入するダンパー量に応じて変動し、あるダンパー量で極値をとる傾向を示すことがわかる。ただし、44H の  $Q_{max}$ ,  $R_{max}$  は、他のモデルと傾向が異なり (付録 2)、極値の判断をすることが難しい。 $E_d/E$  に着目すると、各架構において  $0.01 \sim 0.015$  で明確に極値をとる、他の応答値においてもそのダンパー量付近で極値をとる傾向が見られる。これより、本論文では、投入するダンパー量の上限値を  $E_d/E$  が極値をとる時とし、そのダンパー量を最適ダンパー量と呼ぶ。次に、図 8 の 37H の配置形式別において、(a), (b) の  $Q_{max}$ ,  $R_{max}$  は 1-6 配置、2-5 配置、3-4 配置、千鳥配置の順に小さくなり、(c) の  $E_d/E$  は 1-6 配置、2-5 配置、3-4 配置、千鳥配置の順に大きくなることわかる。また、架構別と同様に各応答値は極値をとる傾向が見られる。しかし、千鳥配置の  $E_d/E$  は、ダンパー量の増加に伴う減少傾向があまり見られない。今回の  $d\alpha_{y1}$  の検討範囲において、千鳥配置は他の連層配置に比べ、ダンパーのエネルギー吸収率を高める配置と言える。配置形式別の最適ダンパー量は架構別と同様に  $E_d/E$  から判別するものとするが、極値を判断しにくい千鳥配置は  $Q_{max}$ ,  $R_{max}$  が極値をとる時のダンパー量を最適値とする。以上より、各架構および各配置形式における最適ダンパー量を表 2 に示す。次節以降の架構および配置形式が応答変化に与える影響についての検討を行うにあたり、ダンパー量の違いによる影響を除外するため、ダンパー量を統一にする必要がある。表 2 より各最適ダンパー量が  $0.01 \sim 0.025$  の範囲にあり、 $0.015$  をとるも

表2 最適ダンパー量  $\alpha_{y1}$

| 架構  | ダンパー配置形式 | $\alpha_{y1}$ |
|-----|----------|---------------|
| 30H | 1-6配置    | 0.025         |
|     | 2-5配置    | 0.015         |
|     | 3-4配置    | 0.015         |
|     | 千鳥配置     | 0.020         |
| 37H | 1-6配置    | 0.020         |
|     | 2-5配置    | 0.015         |
|     | 3-4配置    | 0.015         |
|     | 千鳥配置     | 0.015         |
| 44H | 1-6配置    | 0.015         |
|     | 2-5配置    | 0.010         |
|     | 3-4配置    | 0.015         |
|     | 千鳥配置     | 0.020         |

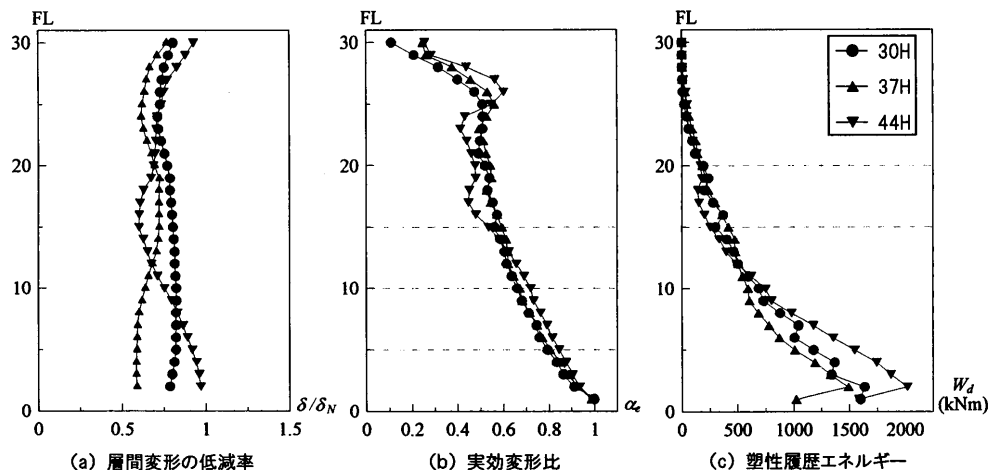


図9 架構剛性の違いによる応答変化(2-5配置,  $\alpha_{y1} = 0.015$ )

表3 入力エネルギーの速度換算値  $V_E$

( $\alpha_{y1} = 0.015$ )

| 架構  | ダンパー配置形式 | $T_1$ (s) | $V_E$ (m/s) |
|-----|----------|-----------|-------------|
| 30H | 1-6配置    | 3.35      | 1.44        |
|     | 2-5配置    | 3.21      | 1.73        |
|     | 3-4配置    | 3.13      | 1.77        |
|     | 千鳥配置     | 3.06      | 1.73        |
| 37H | 1-6配置    | 4.03      | 1.51        |
|     | 2-5配置    | 3.84      | 1.49        |
|     | 3-4配置    | 3.70      | 1.49        |
|     | 千鳥配置     | 3.51      | 1.50        |
| 44H | 1-6配置    | 4.70      | 1.68        |
|     | 2-5配置    | 4.43      | 1.57        |
|     | 3-4配置    | 4.22      | 1.51        |
|     | 千鳥配置     | 3.91      | 1.48        |

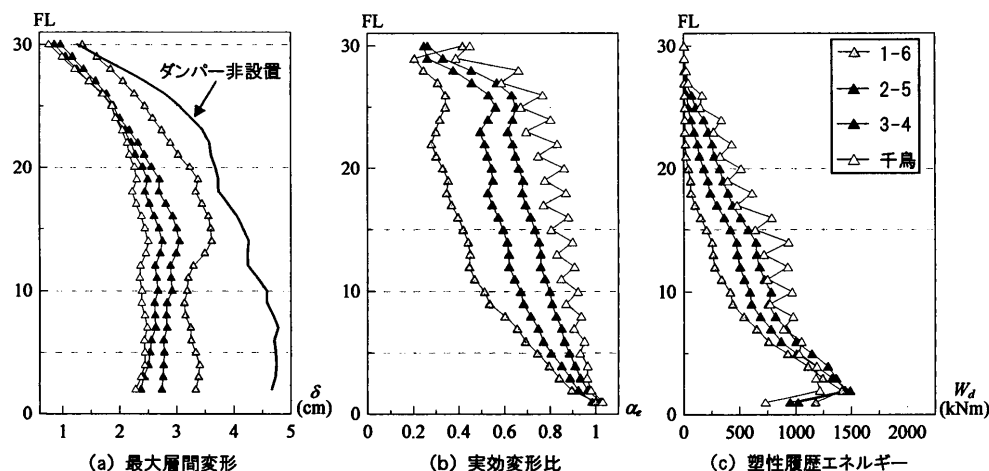


図10 配置形式の違いによる応答変化(37H,  $\alpha_{y1} = 0.015$ )

のことが多いことから、以降の検討は0.015で統一する。表3に、 $\alpha_{y1} = 0.015$ における各モデルの弾性1次固有周期  $T_1$  および(6)式より求めた入力エネルギーの速度換算値  $V_E$  を示す。

$$V_E = \sqrt{\frac{2E}{M}} \quad (6)$$

ここで、 $M$ : 建物総質量である。

表3より、 $V_E$ の最大値(30Hの3-4配)に対する  $V_E$ の最小値(30Hの2-5配)に対する比率は0.81であり、各モデルの  $V_E$ の差は架構剛性およびダンパーの配置形式による周期の違いにより生じている。

### 3.2 架構剛性の違いによる応答変化

本節では、制振部材を設置する際に主架構の剛性の違いが応答にどのような影響を及ぼすのかについて考察を行う。図9に、2-5配置の30H、37H、44Hにおける応答値の高さ方向分布を示す。ここではダンパー非設置時の層間変形  $\delta_N$  に対するダンパーの設置時の層間変形  $\delta$  の比率  $\delta/\delta_N$  (低減率)、時刻歴応答解析結果から算出した実効変形比  $\alpha_e$  およびダンパーの塑性履歴エネルギー  $W_d$  について示す。図9(a)より、架構によってダンパー設置による応答低減量および応答低減層が異なることがわかる。3種の架構の中で最も架構剛性の高い30Hの層間変形は、ダンパーを設置することで、全層で概ね2割の応答低減を示す。37Hの層間変形はダンパーを設置することで下層および上層で4割程度、中層で3割程度低減し、30Hよりも応答低減が全層で大きくなる。最も剛性の低い44Hの層間変形はダンパーを設置することで下層および上層で1.5割程度、中層で4

割程度低減し、下層および上層において30Hと比べて応答低減が小さいことがわかる。以上より、架構剛性を低減させることで、ダンパーを設置したことによる応答低減量が全層で大きくなるが、過剰に架構剛性を低くしてしまうと応答低減箇所にばらつきが生まれ、必ずしも低減量が全層で大きくなるとは限らないことが確認出来る。次に、ダンパーが有効に働いているのかを示す  $\alpha_e$  および  $W_d$  に着目する。図9(b)より、 $\alpha_e$  は架構の違いによってあまり差が見られないことがわかる。いずれの架構においても上層になるにつれ、 $\alpha_e$  が減少し、25層以上で  $\alpha_e$  の値が極端に減少する傾向が見られる。図9(c)より、 $W_d$  は架構の違いによってあまり差が見られないことがわかる。また、上層ほど  $W_d$  が小さくなり、1~20層で全体の90%を占めるため、上層のダンパーは有効に機能していないことがわかる。 $\alpha_e$  および  $W_d$  の結果から、超高層建物に対して制振部材を有効に働かせるためには、上層において実効変形比を大きくし、ダンパーにエネルギーを吸収させることが重要となることがわかる。

### 3.3 ダンパーの配置形式の違いによる応答変化

本節では、制振部材を設置する際に配置形式の違いが応答にどのような影響を及ぼすのかについて考察を行う。図10に、37Hの1-6配置、2-5配置、3-4配置、千鳥配置の応答値の高さ方向分布を示す。ここでは最大層間変形  $\delta$ 、実効変形比  $\alpha_e$  およびダンパーの塑性履歴エネルギー  $W_d$  について示す。図10(a)には、ダンパー非設置時の最大層間変形  $\delta_N$  も重ねて示す。図10(a)より、1-6配置、2-5配置、3-4配置、千鳥配置の順に応答が低減することがわかる。図10(b),

(c)より,  $\alpha_e$ および $W_d$ は1-6配置, 2-5配置, 3-4配置, 千鳥配置の順に大きくなり, この順にダンパーが有効に働く。高さ方向について着目すると,  $\alpha_e$ および $W_d$ は配置形式により下層から上層への値の減少率に差があり, 1-6配置, 2-5配置, 3-4配置, 千鳥配置の順に上層のダンパーがエネルギーを吸収することがわかる。以上より, 制振効果には配置形式による明確な差があることがわかる。

#### 4. 骨組特性値を用いた制振効果の評価方法の提案

##### 4.1 骨組特性値の概要

前章では, ダンパー量, 架構剛性およびダンパーの配置形式の違いによる応答変化について検討を行った。これらの応答変化の傾向を得るためには, 時刻歴応答解析を用いたことにより多大な作業時間および解析時間を要した。そこで, 本章では, 3章で得られた傾向を時刻歴応答解析を行わずに, 骨組の静的解析のみから把握することを目的とし, それらの評価を行える指標の構築を行う。本論文では笠井・岩崎<sup>9)</sup>により1層構造について提案され, 石井・笠井<sup>7)</sup>により多層構造に拡張された「骨組特性値」を用いる。

骨組特性値は主架構のみの弾性部材モデル(状態 $N$ モデル)と制振部材設置位置に剛性が極端に大きい弾性バネを挿入した(状態 $R$ モデル)2ケースの静的解析結果から得られる<sup>7)</sup>。なお, 静的解析時の荷重は $A_i$ 分布に沿うものとする。本論文で用いる骨組特性値 $\alpha_N^{i,j}$ および $K_{bs}^{i,j}$ は(7)~(9)式で表される。

$$\alpha_N^{i,j} = \frac{\delta_{ds}^{i,j}}{\delta_N^{i,j}} \quad (7)$$

$$K_{bs}^{i,j} = \alpha_N^{i,j} K_{dr}^{i,j} \quad (8)$$

$$K_{dr}^{i,j} = \frac{F_{ds}^{i,j}}{\delta_R^{i,j}} \quad (9)$$

ここで,  $\delta_N^{i,j}$ : 制振部材設置箇所の相対変形の水平成分,  $\delta_{ds}^{i,j}$ : 層間変形,  $F_{ds}^{i,j}$ : 制振部材設置箇所の弾性バネが負担する軸力の水平成分, 右上の添え字 $(i,j)$ は $i$ 層 $j$ 番目の制振部材を示す。また, 右下の添え字 $N$ および $R$ は, 状態 $N$ モデルおよび状態 $R$ モデルによる計算値であることを示す。

$\alpha_N^{i,j}$ はダンパー量0の時の実効変形比 $\alpha_e$ に当たるため, その設置箇所における $\alpha_e$ の上限値を表し<sup>13)</sup>,  $K_{bs}^{i,j}$ はその値が大きいほど曲げ変形を起こしにくいことを表すため, 制振部材設置箇所の架構の曲げ剛性と捉えることが出来る。

##### 4.2 実効変形比の予測式の提案

3章において, ダンパーの設置による制振効果には架構剛性による影響が小さく, 配置形式による影響が大きいことを示した。また, 架構剛性の違いによるダンパーの塑性履歴エネルギー $W_d$ やダンパーの配置形式の違いによる最大層間変形の低減量および $W_d$ の評価順序は, 実効変形比 $\alpha_e$ と対応することが分かった。そこで, 本節では $\alpha_e$ に代わる評価指標を骨組特性値に着目し構築する。

はじめに, 提案する評価指標を構築するにあたり, 前節まで扱っていた部材モデルではなく, せん断棒モデルで考えを進めていく。これは, 図11のように骨組特性値が部材モデルからせん断棒モデルへの各諸元の変換則の中で扱われているからである。以下に部材モデルとせん断棒モデルの対応関係を示す。(10)~(12)式より,  $\alpha_N$ を用いて, 部材モデルのダンパーの軸変形の水平成分 $\delta_d$ , 軸力の水平成分 $F_d$ および剛性の水平成分 $K_d$ を, せん断棒モデルのダンパーの変位 $\delta_{ds}$ , 軸力 $F_{ds}$ および剛性 $K_{ds}$ に変換することが出来る<sup>7)</sup>。添え字の $s$ はせん断棒モデルの諸元および応答値を示す。

$$\delta_d = \alpha_N \cdot \delta_{ds} \quad (10)$$

$$F_d = \frac{F_{ds}}{\alpha_N} \quad (11)$$

$$K_d = \frac{K_{ds}}{\alpha_N^2} \quad (12)$$

次に, (13)式で表される部材モデルの実効変形比 $\alpha_e$ を, 骨組特性値を用いて変換したせん断棒モデルで表す。

$$\alpha_e = \frac{\delta_d}{\delta} \quad (13)$$

文献7より, 部材モデルにおける層間変形 $\delta$ はせん断棒モデルにおける層間変形 $\delta_s (= \delta_{ds} + \delta_{bs})$ と同一である。これと(10)式より, (13)式は(14)式のように書き換えられる。(14)式の $\alpha_{es}$ は, せん断棒モデルの実効変形比であり, (13)式の $\alpha_e$ と等価なものである。

$$\begin{aligned} \alpha_{es} &= \frac{\alpha_N \cdot \delta_{ds}}{\delta_{ds} + \delta_{bs}} = \frac{\alpha_N}{1 + \delta_{bs}/\delta_{ds}} \\ &= \frac{\alpha_N}{1 + (F_{ds}/K_{bs}) / \{F_{ds}/(\alpha_N^2 \cdot K_{ds})\}} \\ &= \frac{\alpha_N}{1 + (\alpha_N^2 \cdot K_{ds})/K_{bs}} = \frac{\alpha_N}{1 + \alpha_N^2 \cdot \kappa_{ds}} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\kappa_{ds} = \frac{K_{ds}}{K_{bs}} \quad (15)$$

ここで,  $K_{ds}$ はせん断棒モデルにおける弾塑性ダンパー(擬似ダンパー)の剛性である。

(14), (15)式より, 実効変形比 $\alpha_{es}$ は,  $\alpha_N$ ,  $K_{ds}$ および $K_{bs}$ に依存することがわかる。 $\alpha_N$ は, 前述したように, 実効変形比の上限値を表し, (14)式の分母の $\kappa_{ds}$ が0に近いほど, 分母全体が1に近づき,  $\alpha_{es}$ は $\alpha_N$ に近づくことになる。ダンパー量(ダンパー剛性)を増加させていく場合,  $K_{bs}$ があらかじめ $K_{ds}$ よりも大きな値であれば,  $\alpha_{es}$ は $\alpha_N$ に近い値をとり, 値の変動が小さい。しかし,  $K_{bs}$ があらかじめ $K_{ds}$ と同等または小さい値であると,  $\alpha_{es}$ の値の変動が大きくなる。また,  $K_{ds}$ を定めた場合,  $\alpha_N$ が大きいほど, または $K_{ds}$ に比べ $K_{bs}$ が大きいほど,  $\alpha_{es}$ は大きくなる。ここで, ダンパーの配置形式の違いによる $\alpha_N$ および $K_{bs}$ について考察を行う。図12(a), (b)に, 3.3節で用いた37Hの1-6配置, 2-5配置, 3-4配置, 千鳥配置の $\alpha_N$ および $K_{bs}$ を示す。図12(a)より, 配置により $\alpha_N$ が異なり, 連層配置の1-6配置, 2-5配置, 3-4配置では中央に配置するほど大きく, 千鳥配置は2-5配置と3-4配置を1層ごとに組み合わせたものとなっていることがわかる。図12(b)より, 曲げ剛性である $K_{bs}$ は, 1-6配置, 2-5配置, 3-4配置, 千鳥配置の順に大きくなり, 特に千鳥配置は連層配置に比べ大きな値をとることがわかる。ダンパーの配置形式により,  $K_{bs}$ が異なるため, それぞれに同じダンパー量を投入していくと, 1-6配置, 2-5配置, 3-4配置, 千鳥配置の順に,  $\alpha_N$ からそのダンパー量時の実効変形比 $\alpha_{es}$ までの値の減少量が小さいと考えられる((14)式)。特に, 千鳥配置は他の配置よりも $K_{bs}$ が

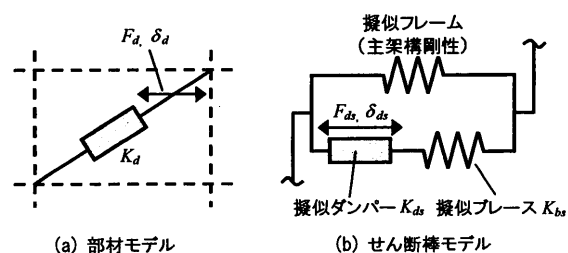


図11 部材モデルとせん断棒モデルの対応関係

大きく、ダンパー量を増加させた際の実効変形比 $\alpha_{es}$ の減少量が小さい。このため、千鳥配置は、 $\alpha_N$ が2-5配置と3-4配置と近い値であっても、実際にダンパーを投入した際に、2-5配置および3-4配置よりも実効変形比 $\alpha_{es}$ が大きくなると考えられる。3.3節の時刻歴応答解析結果(図10)より、千鳥配置は2-5配置および3-4配置よりも実効変形比 $\alpha_e$ が大きくなっていた。以上より、ダンパーの配置形式によって、実効変形比の上限値 $\alpha_N$ は大小様々であり、実際にダンパーを設置する場合には、ダンパー剛性 $K_d$ とダンパー設置位置における曲げ剛性 $K_{bs}$ との大小関係が重要であることがわかった。

また、(14)、(15)式において、 $\alpha_N$ および $K_{bs}$ は一度算出を行えば変動することのないものであるが、ダンパー剛性である $K_d$ はダンパーの塑性化の度合いにより変動する。このため、ダンパーの塑性化の有無をどのように考慮するかが重要となる。 $K_{bs}$ にダンパーの1次剛性 $K_{d1}$ を用いた場合、 $\alpha_{es}$ はダンパーが弾性時の $\alpha_e$ を表すことになる。 $K_{d1}$ はダンパーの諸元を定めた時点で決まる値のため、ダンパーが弾性時の $\alpha_e$ は時刻歴応答解析を行わずに予測することが出来る。以降、(14)、(15)式において、 $K_{bs}$ に $K_{d1}$ を用いたものを $\alpha_{es,1}$ と呼ぶ。実効変形比はダンパーが弾性的場合に最低値をとり、塑性が進むと増大していくため、 $\alpha_{es,1}$ は $\alpha_e$ の下限值を表す。

ダンパーの塑性化を考慮した実効変形比の予測式は4.5節で示す。

#### 4.3 実効変形比の予測値と応答値との関係

本節では、実効変形比の予測値である $\alpha_N$ および $\alpha_{es,1}$ と応答値との関係について述べていく。

はじめに、実効変形比の上限値の予測値である $\alpha_N$ および下限値の予測値である $\alpha_{es,1}$ の精度を確認する。図13(a)、(b)に37Hの2-5配置における予測値 $\alpha_N$ および $\alpha_{es,1}$ と応答値 $\alpha_e$ との比較を示す。図13(a)の $\alpha_e$ は、ダンパーを設置していないモデルに対して、ダンパー配置位置の節点の変位から求めた $\delta_d$ を用いて算出した。図13(a)より、最上層を除き、誤差が8%以内に収まり、精度は良好であることがわかる。図13(b)の $\alpha_e$ はダンパー弾性時の実効変形比の予測値 $\alpha_{es,1}$ と比較するため、ダンパーを弾性とした解析結果を用いた。図13(b)より、1~25層において、誤差は概ね10%以内に収まり、精度は良好であることがわかる。図13(a)、(b)において、予測値と応答値との誤差の原因は、上層の逆せん断および高次モードによる影響であると思われる。

次に、 $\alpha_N$ 、 $\alpha_{es,1}$ と $\alpha_e$ の関係について述べる。それらの高さ方向分布を図14に示す。 $\alpha_N$ は $\alpha_e$ の上限値を表し、 $\alpha_{es,1}$ は $\alpha_e$ の下限値を表すため、ダンパー量が変化した際に $\alpha_e$ が変動する幅を $\alpha_N$ および $\alpha_{es,1}$ から把握することが出来る。

次に、 $\alpha_N$ および $\alpha_{es,1}$ を用いて、ダンパーの設置状況が異なる場合の $\alpha_e$ の評価および層間変形の低減量の評価を行えるのかについて検討を行う。図15に、2-5配置の架構剛性の異なる30H、37H、44Hの $\alpha_N$ 、 $\alpha_{es,1}$ 、 $\alpha_e$ および $\delta/\delta_N$ の高さ方向分布を示す。架構の違いによる $\alpha_e$ の差が小さいことおよび上層ほど値が低減すること(図15(b))は、 $\alpha_{es,1}$ (図15(a))および $\alpha_N$ (図15(c))から推定することが出来る。 $\alpha_e$ の高さ方向の分布形状に着目すると、 $\alpha_N$ よりも $\alpha_{es,1}$ のほうがその形状を表現できているため、 $\alpha_{es,1}$ のみを見れば $\alpha_e$ の傾向を判断することが出来る。図15(d)の層間変形の低減率より、30Hおよび37Hの評価順序は $\alpha_{es,1}$ と対応するが、44Hでは対応しないことがわかる。図16に、37Hの1-6配置、2-5配置、3-4配置、千鳥配置の $\alpha_N$ 、 $\alpha_{es,1}$ 、 $\alpha_e$ および $\delta$ の高さ方向分布を示す。図16(a)、(b)より、配置形式の違いによる $\alpha_e$ の評価順序および高さ方向の分布形状を $\alpha_{es,1}$

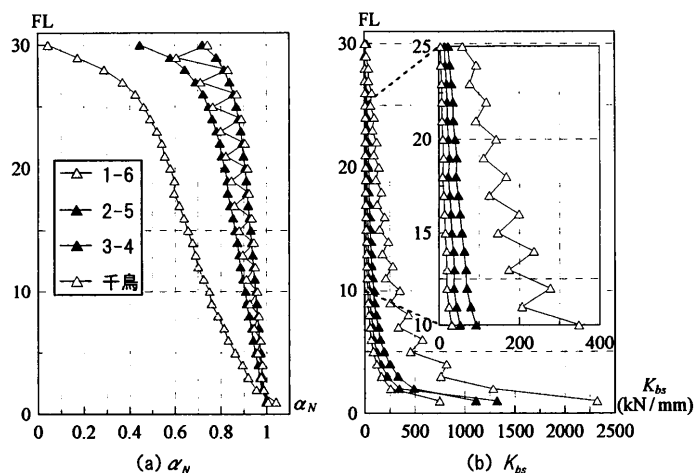


図12 配置形式の違いによる $\alpha_N$ および $K_{bs}$ (37H)

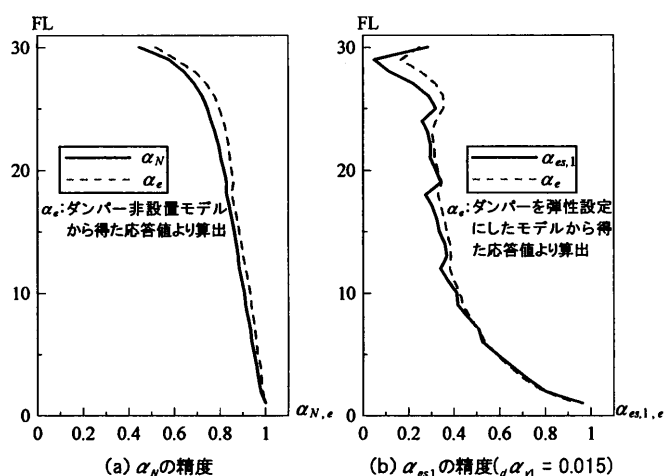


図13 予測値の精度検証(37H, 2-5配置)

から推定することが出来る。

図16(c)より、 $\alpha_N$ の評価順序は $\alpha_e$ と対応しないことがわかる。図16(d)の最大層間変形 $\delta$ の評価順序は $\alpha_{es,1}$ の評価順序と対応している。以上より、 $\alpha_e$ の評価順序、 $\alpha_e$ の高さ方向の分布形状および応答低減量の評価順序は静的解析から算出した $\alpha_{es,1}$ から捉えられることが分かった。ただし、架構別の検討において、44Hでは対応関係が見られなかった。

#### 4.4 最適ダンパー量と実効変形比との関係

本節では、多数の時刻歴応答解析から得られる最適ダンパー量(3.1節、前述)を静的解析のみから捉えることを目標とした検討を行う。前節と同様に実効変形比に着目した検討を行っていく。

はじめに、最適ダンパー量と時刻歴応答解析から得られる実効変形比 $\alpha_e$ との関係に見ていく。各モデルの最適ダンパー量を判別するために、本論文では各ダンパー量における入力エネルギー $E$ に対する全ダンパーのエネルギー吸収量 $E_d$ の比率 $E_d/E$ が極値をとる時のダンパー量を最適値とした(3.1節、前述)。図17に、 $E_d/E$ と $\alpha_e$ の

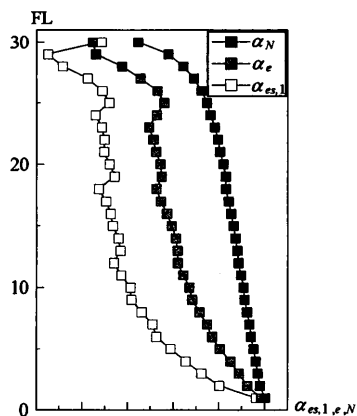
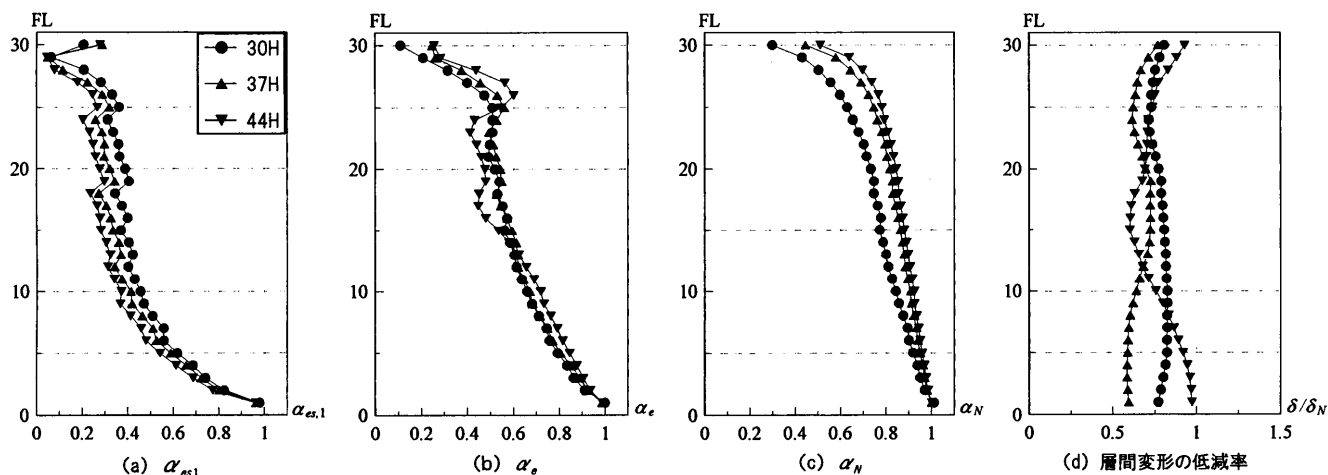
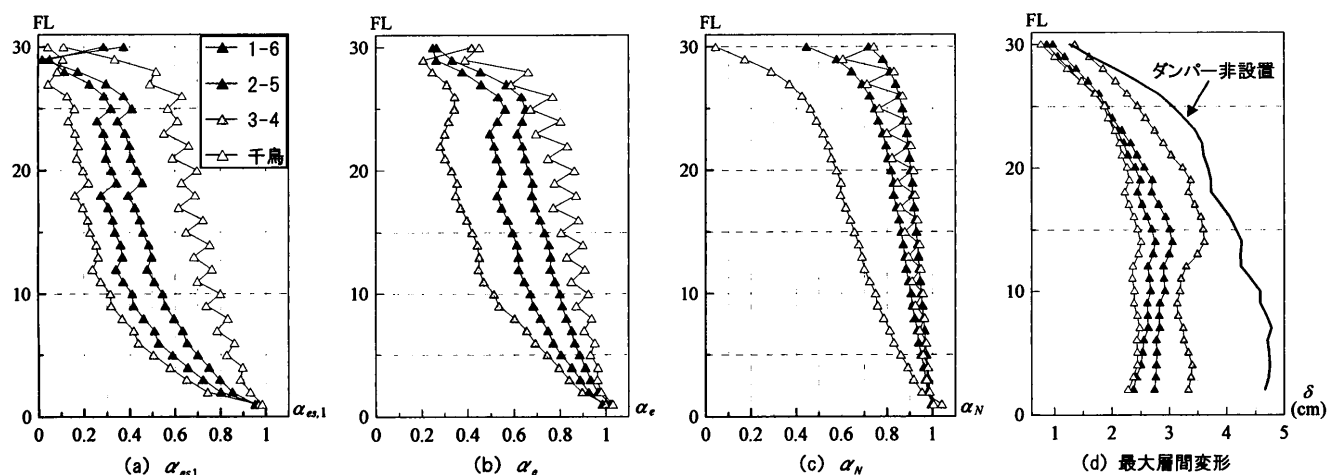
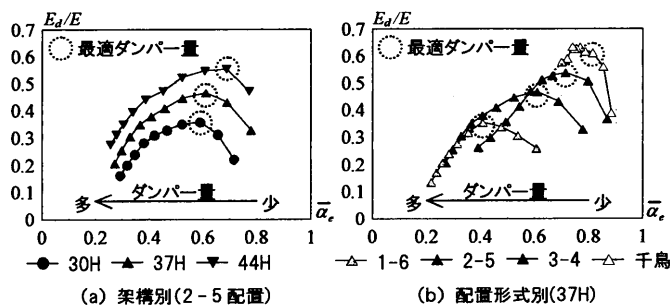


図14  $\alpha_{es,1}$ 、 $\alpha_e$ および $\alpha_N$ の関係(37H, 2-5配置,  $\alpha_{j1} = 0.015$ )

図 15 実効変形比の予測値と応答値 - 架構別(2-5 配置,  $\alpha_{y1} = 0.015$ ) -図 16 実効変形比の予測値と応答値 - 配置形式別(37H,  $\alpha_{y1} = 0.015$ ) -

平均値  $\bar{\alpha}_e$  の相関図を示す。以降、応答値の平均値には「 $\bar{\alpha}$ 」を付けて区別する。図 17 には、2つの応答値とダンパー量との関係が見られるように、ダンパー量についても示す。各プロットは、左から  $\alpha_{y1} = 0.05, 0.045, 0.04, 0.035, 0.03, 0.025, 0.02, 0.015, 0.01, 0.005$  の順に並んでいる。図 17 より、 $\bar{\alpha}_e$  は投入するダンパー量が少ないほど大きな値をとることがわかる。図 17(a)より、架構別において、 $\bar{\alpha}_e$  は 3 種類の架構が 0.25~0.8 の範囲にプロットされ、架構の違いによる影響が小さいことが表れている。また、図 17(b)の配置形式別においては、各ダンパー量における  $\bar{\alpha}_e$  が 1-6 配置、2-5 配置、3-4 配置、千鳥配置の順に大きくなり、配置形式による影響が大きいことが表されている。これらより、 $\bar{\alpha}_e$  はそのダンパー設置状況における全層での  $\alpha_e$  の代表値として用いることが出来る。図 17 には時刻歴応答解析によって定めた最適ダンパー量時の値を○で示している。最適ダンパー量と 2つの応答値 ( $E_d/E$  および  $\bar{\alpha}_e$ ) との関係について、図 17(a)の 37H の 2-5 配置に着目し、考察する。37H の 2-5 配置の最適ダンパー量は  $\alpha_{y1} = 0.015$  (表 2) であり、その時の  $E_d/E$  は極値をとる。また、前述したように、 $\bar{\alpha}_e$  は投入するダンパー量が少ないほど大きな値をとるため、最適ダンパー量時の  $\bar{\alpha}_e$  は、最もダンパー量が少ない  $\alpha_{y1} = 0.005$  の時に比べ小さい値をとることがわかる。この関係は、図 17 の他のモデルでも同様に得られる。以上より、 $E_d/E$  が極値をとるためにはある程度のダンパー量を投入し、 $\bar{\alpha}_e$  の減少を許容する必要があることがわかる。そして、 $E_d/E$  が極値をとる時の  $\bar{\alpha}_e$  を静的解析のみから予測することで、最適ダンパー量を予測出来ると考えられる。

図 17  $E_d/E$  と  $\bar{\alpha}_e$  との関係

次に、最適ダンパー量時の  $\bar{\alpha}_e$  を  $\bar{\alpha}_N$  および  $\bar{\alpha}_{es,1}$  から予測することを考えていく。図 14 (前述) に、37H の 2-5 配置の最適ダンパー量における  $\alpha_{es,1}$ 、 $\alpha_e$  および  $\alpha_N$  の高さ方向分布を示しているが、最上階を除いて、 $\alpha_{es,1}$  と  $\alpha_N$  との中間に  $\alpha_e$  が概ね位置していることがわかる。この  $\alpha_{es,1}$ 、 $\alpha_e$  および  $\alpha_N$  の関係を、 $\bar{\alpha}_{es,1}$ 、 $\bar{\alpha}_e$  および  $\bar{\alpha}_N$  においても同様の関係性を示すのかについて検討を行う。図 18 に 37H の 2-5 配置における  $\bar{\alpha}_{es,1}$ 、 $\bar{\alpha}_e$  および  $\bar{\alpha}_N$  と  $\bar{\kappa}_d$  との関係を示す。横軸には (14) 式の  $\kappa_d$  の各層の平均値  $\bar{\kappa}_d$  をとり、擬似ダンパー剛性と擬似ブレース剛性との関係についても見られるようにする。図 18 より、 $\bar{\alpha}_e$  は  $\bar{\kappa}_d$  が小さくなるほど、ダンパー非設置状態である  $\bar{\alpha}_N$  に近い値を示す。一方、 $\bar{\kappa}_d$  が大きくなるほど、 $\bar{\alpha}_e$  は  $\bar{\alpha}_{es,1}$  に近づいていく。これは、ダンパー量が増加するほどダンパーの塑性化が小さくなるため、ダンパーの 1 次剛性より求めた  $\alpha_{es,1}$  の平均値である  $\bar{\alpha}_{es,1}$  に近づくと考えられる。図 18 に示した最適ダンパー量時において、 $\bar{\alpha}_N$  お



よび $\bar{\alpha}_{es,1}$ の中間点に $\bar{\alpha}_e$ が概ね位置することがわかる。他のモデルの最適ダンパー量における $\bar{\alpha}_{es,1}$ 、 $\bar{\alpha}_e$ および $\bar{\alpha}_N$ の関係を図19に示す。図19より、1-6配置の30Hおよび千鳥配置を除いたモデルにおいて、 $\bar{\alpha}_N$ および $\bar{\alpha}_{es,1}$ の中間点に $\bar{\alpha}_e$ が概ね位置することがわかる。1-6配置の30Hにおける $\bar{\alpha}_e$ が $\bar{\alpha}_{es,1}$ に近づいているのは、中層・上層のダンパーがあまり塑性化しないため、 $\bar{\alpha}_{es,1}$ とほぼ同等になるからである。また、千鳥配置における $\bar{\alpha}_e$ が $\bar{\alpha}_N$ に近づいているのは、他の配置よりも全層においてダンパーが塑性化しているためである。以上より、2-5配置および3-4配置においては、 $\bar{\alpha}_N$ および $\bar{\alpha}_{es,1}$ の中間点を最適ダンパー量における $\bar{\alpha}_e$ として見る事が出来るが、1-6配置および千鳥配置はその傾向があまり見られないことがわかった。ただし、1-6配置および千鳥配置は、図18の $\bar{\alpha}_N$ 、 $\bar{\alpha}_e$ および $\bar{\alpha}_{es,1}$ と $\bar{\kappa}_{ds}$ との関係から、ダンパーの塑性化が生じるダンパー量を絞り込み、検討数を減らすことが出来る。

最適ダンパー量の予測または検討範囲の絞り込みを行うためには、時刻歴応答解析を行わずに $\bar{\alpha}_e$ を定める必要があり、その $\bar{\alpha}_e$ の予測式について次節で提案する。

#### 4.5 塑性化を考慮した実効変形比の予測式の提案および精度検証

ダンパーが弾性時の実効変形比の予測値 $\alpha_{es,1}$  ((14)式)は、ダンパーの1次剛性を用いたので弾塑性ダンパーの塑性化を考慮しておらず、時刻歴応答解析結果から算出した実効変形比 $\alpha_e$ を大きく下回る(図14)。そこで、塑性化を考慮した実効変形比の予測値を得るために、(14)、(15)式の擬似ダンパーの剛性 $K_{ds}$ の代わりに、塑性化を考慮した等価剛性 $K_{ds,eq}$ を用いることとする。 $K_{ds,eq}$ はダンパーの最大変形点と原点を結んだ割線剛性と考え、ダンパーの塑性率 $\mu_{ds}$ を与えれば次式で表すことが出来る。

$$K_{ds,eq} = \frac{K_{ds}}{\mu_{ds}} \quad (\mu_{ds} \geq 1) \quad (16)$$

弾塑性ダンパーの塑性化を考慮した実効変形比の予測値は、(14)、(15)式に(16)式を代入した(17)、(18)式となる。

$$\alpha_{es,eq} = \frac{\alpha_N}{1 + \alpha_N^2 \cdot \kappa_{ds,eq}} \quad (17)$$

$$\kappa_{ds,eq} = \frac{K_{ds,eq}}{K_{bs}} = \frac{K_{ds}}{K_{bs} \cdot \mu_{ds}} \quad (18)$$

$\alpha_{es,eq}$ の精度を確認するために、37Hの2-5配置のダンパー量0.005~0.05までの全てのダンパー量を対象とした $\alpha_{es,eq}/\alpha_e$ と $\mu_{ds}$ との関係を図20に示す。色付きのプロットは1~20層、中抜きのプロットは21~30層の値を表す。なお、(18)式に用いる $\mu_{ds}$ には時刻歴応答解析より算出した精解値 $\mu_d$ を用いる。図20より、1~20層の値の誤差は20%程度に収まる。特に塑性率が2以上の範囲において、誤差が10%程度に収まり、精度は良好である。しかし、塑性率が1~2の範囲では、 $\alpha_{es,eq}/\alpha_e$ が1を大きく下回るプロットが存在する。そのプロットの多くは、架構の上層部(21~30層)に当たる。4.3節で述べたが、おそらく上層の逆せん断および高次モードによる影響により、およそ20層以上から $\alpha_e$ が増加し、高次モードを考慮していない $\alpha_{es,eq}$ と誤差が生じているのだと思われる。以上より、(17)式の精度は、上層を除き良好である。 $\alpha_{es,eq}$ の平均値 $\bar{\alpha}_{es,eq}$ を定義する際には、上層の誤差が影響することが考えられるので、1~20層までの平均値を用いて算出する必要がある。

本節で提案した $\alpha_{es,eq}$ を用いて、 $\alpha_e$ を予測する場合には各ダンパーの塑性率を定めなければいけない。この塑性率に時刻歴応答解析による精解値を用いることで得られる $\alpha_{es,eq}$ の精度は前述したように

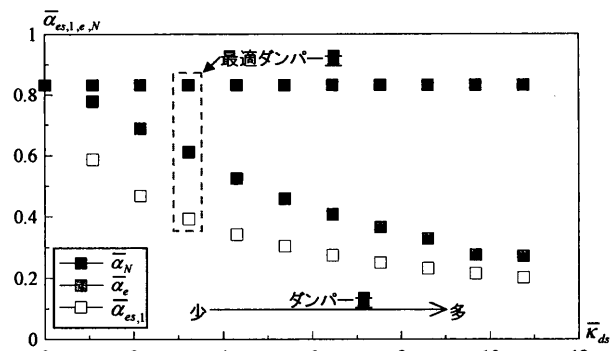


図18  $\bar{\alpha}_{es,1}$ 、 $\bar{\alpha}_N$ と $\bar{\kappa}_{ds}$ との関係(37H, 2-5配置)

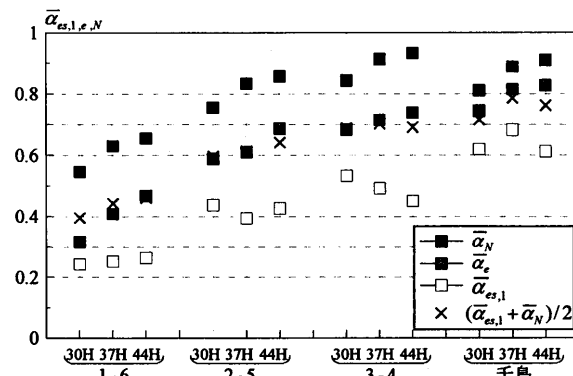


図19 最適ダンパー量における $\bar{\alpha}_{es,1}$ 、 $\bar{\alpha}_N$ の関係

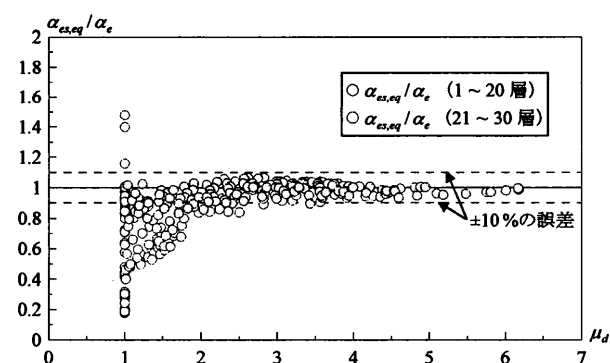


図20  $\alpha_{es,eq}/\alpha_e$ と $\mu_{ds}$ との関係(37H, 2-5配置,  $\alpha_{N1} = 0.005 \sim 0.05$ )

良好な結果を示す。しかし、時刻歴応答解析を行わずに $\alpha_{es,eq}$ を用いた最適ダンパー量の検討を行うためには、検討を行う前段階で塑性率を設定しなければならない。この場合の塑性率は設計時の目標最大値として設定し、その期待する塑性率に対して最適なダンパー量を予測していくような手法をとる必要がある。本論文では、この塑性率の設定を行い、最適ダンパー量の予測が可能かどうかについて検証を行うまでには至らなかった。今後、設計目標値としての塑性率の設定方法を検討し、最適ダンパー量の予測を行う予定である。

#### 5. 状態Rモデルに着目したダンパーの降伏せん断力比分布の提案

4.4節において、最適ダンパー量時の $\bar{\alpha}_e$ は、 $\bar{\alpha}_{es,1}$ と $\bar{\alpha}_N$ との中間点に位置する傾向があることを示した。ただし、1-6配置の $\bar{\alpha}_e$ は、上層の $\alpha_e$ が $\alpha_{es,1}$ に近い値をとるため、中間点よりも下に位置した。1-6配置は、 $\alpha_e$ の上限値である $\alpha_N$ が他の配置より小さく(図16(c))、曲げ変形を起こしやいため、他の配置と同量のダンパー量を各層に投入しても、有効に稼働させることが出来ないと推測出来る。前章まで、高さ方向のダンパーの投入量は地震層せん断力係数の分布係数(Ai分布)に基づく設計用層せん断力比分布(以後、A分布と呼ぶ)

に従い、決定していた。A 分布は、建物の層重量および設計用固有周期のみをパラメータとするため、ダンパーの設置状況を考慮することが出来ない。そこで、本章ではダンパーの設置状況を考慮することの出来る分布を提案する。また、A 分布および提案する分布において、同量のダンパーの鉄骨総重量を投入した際の応答変化について検討し、提案する分布の有用性を示す。提案する分布を用いた場合の最適ダンパー量時における  $\bar{\alpha}_{es,1}$ 、 $\bar{\alpha}_e$  および  $\bar{\alpha}_N$  の関係についても作成する。

提案する分布は、状態 R モデルでの静的解析より得られる各層のダンパーに作用する軸力の分布を用いることとし、(19)式で表される。以降、(19)式によるダンパーの降伏せん断力比分布を R 分布と呼ぶ。

$$\frac{d\alpha_{yi}}{d\alpha_{y1}} = \frac{F_{ar}^{i,j}}{F_{ar}^{1,j}} \quad (19)$$

ここで、 $F_{ar}^{i,j}$ ：状態 R モデルの  $i$  層  $j$  番目のダンパーに作用する軸力である。

図 21 に 37H の 1-6 配置および 2-5 配置における A、R 分布を示す。点線は各層の値を、□プロットは 5 段階を表す。R 分布において、最上層辺りで値が増加するが、これは逆せん断によるものである。そのため、本論文では、逆せん断が作用する部分はその部分の下層の値を用いることとする。図 21 より、A 分布に比べ R 分布の各層で大幅にダンパー量が減少していることがわかる。

図 22 に、同量のダンパーの鉄骨総重量を投入した際の A 分布および R 分布のダンパーの降伏せん断力  $Q_{yi}$  を示す。その時の時刻歴応答解析結果を図 23、24 に示す。図 23(a)、(b)に、最大層間変形  $\delta$  および実効変形比  $\alpha_e$  を示す。図 23(a)より、A 分布と R 分布との最大層間変形は概ね一致していることがわかる。図 23(b)より、R 分布の下層の  $Q_{yi}$  が A 分布より大きくなっているため (図 22)、R 分布の  $\alpha_e$  がわずかに A 分布より小さくなっている。しかし、上層・中層において、R 分布の  $\alpha_e$  が A 分布より大きくなるがわかる。

図 24(a)、(b)に、ダンパーの塑性率  $\mu_d$  および累積塑性変形倍率  $\eta_d$  を示す。図 24(a)、(b)より、R 分布を用いることで、下層の  $\mu_d$  および  $\eta_d$  が A 分布よりも小さくなり、また上層の  $\mu_d$  および  $\eta_d$  が A 分布よりも大きくなるがわかる。特に、図 24(b)の 1-6 配置の  $\eta_d$  では、A 分布の下層で約 80 とするが、R 分布を用いることで約 40 となり、半減させられることがわかる。R 分布は、A 分布よりも上層のダンパー量が少なく、下層のダンパー量が多くなっているため (図 22)、A 分布よりも上層のダンパーが損傷し、下層の損傷集中を防ぐことが出来ている。

以上より、A 分布および R 分布に同量のダンパーの鉄骨総重量を投入した場合、最大層間変形は両者同等の値をとるが、R 分布を用いることで下層のダンパーの損傷集中を防ぐことが出来た。

図 25 に、R 分布を用いた際の最適ダンパー量における  $\bar{\alpha}_{es,1}$ 、 $\bar{\alpha}_e$  および  $\bar{\alpha}_N$  の関係を示す。図 19 において、1-6 配置の  $\bar{\alpha}_e$  は中間点  $(\bar{\alpha}_{es,1} + \bar{\alpha}_N)/2$  よりも下に位置していた。図 25 では、全てモデルにおいて、中間点または中間点よりも上に位置するようになっていく。これより、図 18 における  $\bar{\alpha}_N$ 、 $\bar{\alpha}_e$  および  $\bar{\alpha}_{es,1}$  と  $\bar{\alpha}_d$  との関係から、中間点または中間点よりも上に位置するダンパー量について時刻歴応答解析による検討を行うものとするれば、作業時間および検討時間を軽減出来る。

## 6. おわりに

制振部材は、設置する架構や配置位置など多くのものから影響を

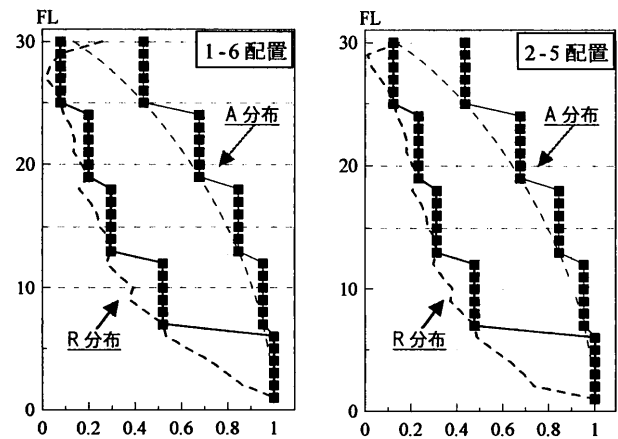


図 21 A 分布と R 分布(37H)

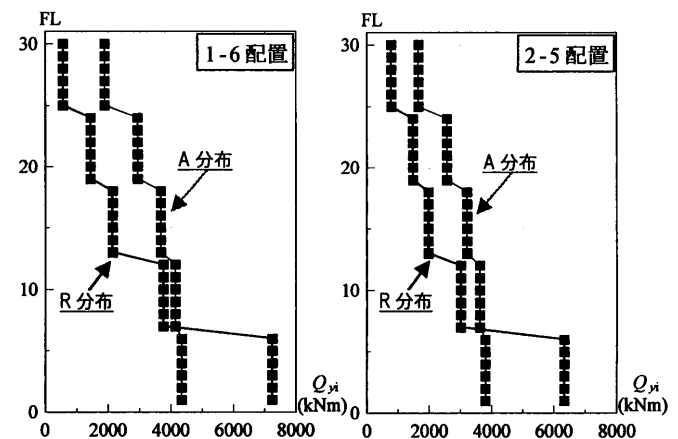
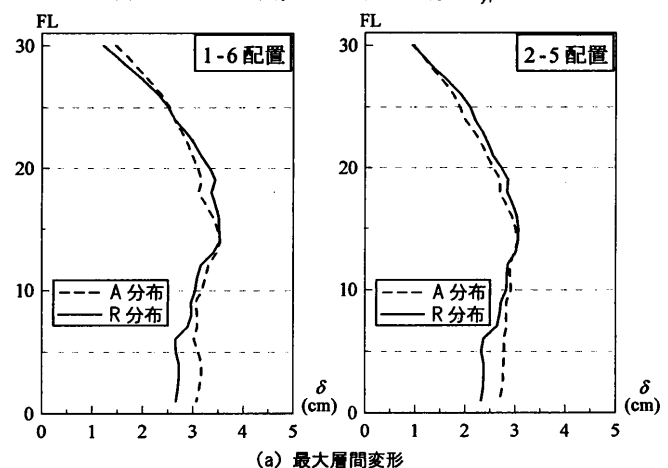
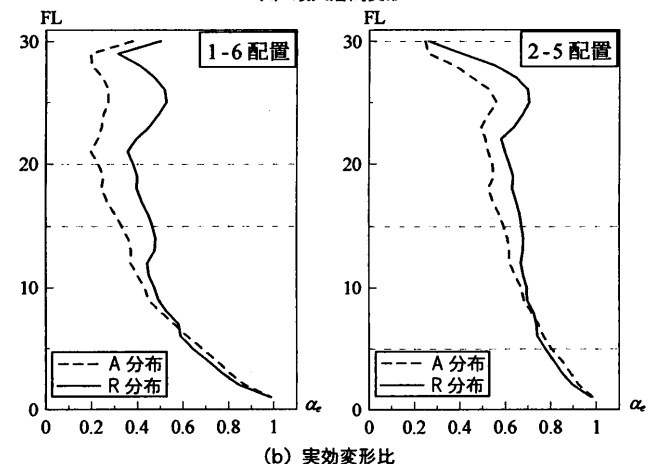


図 22 ダンパーの鉄骨総重量を統一した際の  $Q_{yi}$  (37H)



(a) 最大層間変形



(b) 実効変形比

図 23 A 分布と R 分布との応答比較 - 最大層間変形, 実効変形比(37H) -

受けるため、設置した際の制振効果をパラメトリックな多くの時刻歴応答解析により把握する必要がある。しかし、多層建物に繰り返し時刻歴応答解析を行うには多くの検討作業を要する。そのため、時刻歴応答解析を行う以前に検討範囲を絞り込むことができれば、検討作業軽減につながっていくと考える。そこで本研究では、時刻歴応答解析することなく、有効な制振部材の配置形式および投入量の判断を行える評価指標の提案を目標とし検討を行った。本論文では、30層鋼構造建物を対象として、履歴ダンパーを設置した際のダンパーの投入量、架構剛性およびダンパーの平面方向の配置形式が制振効果に与える影響について、立体部材モデルでの時刻歴応答解析を用いた検討を行い、その把握を行った。さらに、静的解析のみから得られる骨組特性値を用いた評価指標の構築を行い、それが応答値の傾向を捉えられるのか検討を行った。なお、本検討は主架構を弾性とした場合の結果である。得られた知見は以下の通りである。

- (1) 時刻歴応答解析結果より、制振効果は主架構の架構剛性の違いよりも投入するダンパーの投入量およびダンパーの平面方向の配置形式に影響を受ける。ダンパーの投入量には最適値が存在し、ダンパーの平面方向の配置形式では連層配置に比べ千鳥配置による応答低減量が大きくなり、連層配置においては外柱に近い配置ほど応答低減量が小さくなることがわかった。また、架構剛性の違いに着目すると、架構剛性が低いものほど応答低減量が大きくなるとは限らないことがわかった。
- (2) 時刻歴応答解析結果より、実効変形比 $\alpha_e$ （構造体の各層に生じる層間変形のうちダンパーに有効に働く変形成分との層間変形に対する割合）およびダンパーの塑性履歴エネルギー $W_d$ は、上層になるにつれ減少することがわかった。制振部材を有効に働かせるためには、上層において実効変形比を大きくし、ダンパーを変形させ、エネルギー吸収させることが重要となる。設計時には実効変形比をいかに大きく確保するかが重要となる。
- (3) 時刻歴応答解析を行わずに算出が出来る、ダンパーが弾性時の実効変形比 $\alpha_{es,1}$ の予測式を示した。 $\alpha_{es,1}$ および骨組特性値 $\alpha_N$ は実効変形比の下限値および上限値を表し、これらにより、ダンパー量を変化させた際の $\alpha_e$ の変動の幅を把握することが出来る。また、 $\alpha_{es,1}$ により、架構剛性およびダンパーの配置形式の違いによる $\alpha_e$ の評価順序を予測することが出来る。 $\alpha_{es,1}$ は時刻歴応答解析の前に制振効果の傾向を捉える1つの手段となる。
- (4) ダンパーの塑性化を考慮することの出来る実効変形比 $\alpha_{es,eq}$ の予測式を示した。 $\alpha_{es,eq}$ の予測には、ダンパーの塑性化後の等価剛性を算出するために必要なダンパーの塑性率の設定を必要とする。時刻歴応答解析より得たダンパーの塑性率を用いて算出した $\alpha_{es,eq}$ と $\alpha_e$ との誤差は、1~20層において20%程度に収まり、特に塑性率が2以上の範囲において10%程度に収まることを確認した。予測式としての精度は良好であるが、ダンパーの塑性率の設定方法を提案出来ておらず、今後の課題とする。
- (5) 時刻歴応答解析による最適ダンパー量時の実効変形比は、 $\alpha_{es,1}$ および $\alpha_N$ の中間点にほぼ位置することを確認した。ダンパーの塑性率を設定することで、最適ダンパー量および有効に働くダンパー量の範囲を予測することが出来ると考えられる。
- (6) 制振部材設置位置に剛性が極端に大きい弾性バネを挿入したモデル（状態Rモデル）に着目したダンパーの降伏せん断力比分布（R分布）を提案した。R分布および地震層せん断力係数の分布係数（Ai分布）に基づく設計用層せん断力比分布（A分布）

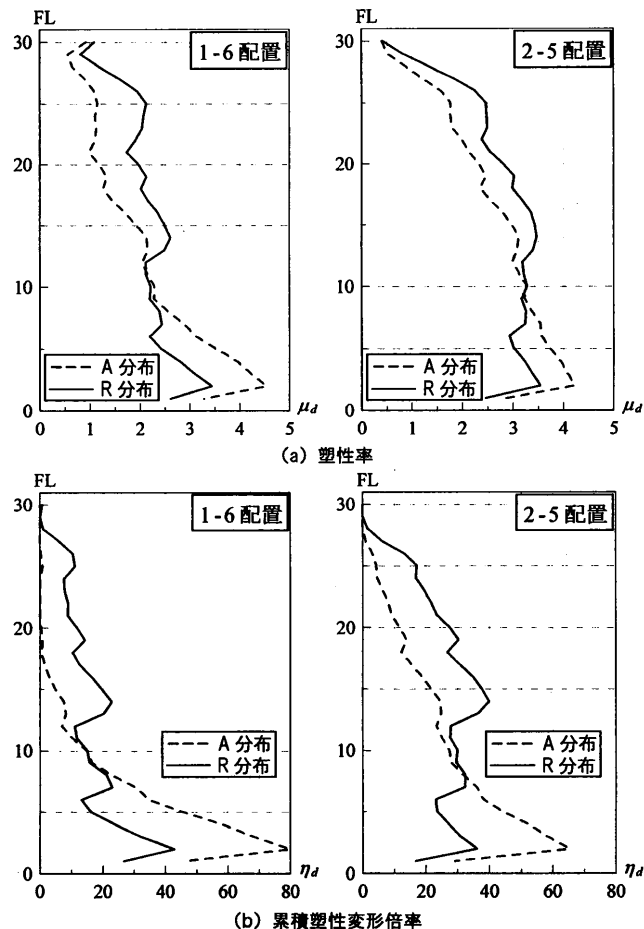


図 24 A 分布と R 分布との応答比較 - 塑性率, 累積塑性変形倍率(37H) -

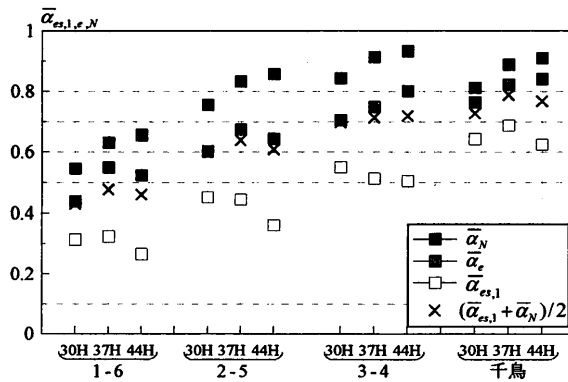


図 25 最適ダンパー量における $\bar{\alpha}_{es,1,eq,N}$ の関係(R 分布)

布)に同量のダンパーの鉄骨総重量を投入した場合、最大層間変形は両者同等になるが、R 分布を用いることで A 分布の際に生じていた下層のダンパーの損傷集中を防ぐことが出来た。R 分布は、下層のダンパーの損傷集中をさせずに、多くの層でダンパーを同程度に損傷させ、稼働させたい設計時に有効なものであると思われる。

本論文で得た知見は、本研究で提案していく評価方法の足掛かりとして、1 種類の入力地震動から得たものであり、複数波を用いた検討については今後の課題とする。

#### 謝辞

本研究は、日建設計、オイレス工業、東京理科大学北村研究室による共同研究の成果の一部を用いたものです。

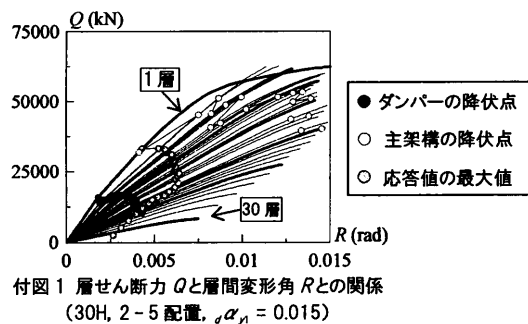
#### 参考文献

- 1) 日本地震構造協会：パッシブ制振構造設計・施工マニュアル，2003.10

- 2) 島田侑, 佐藤大樹, 長江拓也, 北村春幸, 福山國夫, 梶原浩一, 井上貴仁, 中島正愛, 斎藤大樹, 福和伸夫, 日高桃子: 超高層建物の下層階に部分配置する履歴型ダンパーの効果と影響に関する検討—長周期地震動を想定した耐震改修—, 日本建築学会構造系論文集, Vol.75, No.649, pp549-557, 2010.3
- 3) 平田淳二, 寺本隆幸: 各種ダンパーを用いた鋼構造建物の応答性状に関する研究—ダンパー配置による影響—, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), pp569-570, 2008.9
- 4) 山崎昭司, 大宮幸, 村岡康祐, 寺本隆幸: 低降伏点鋼制振部材を用いた超高層建築の応答性状に関する研究(その1:高さ方向配置による影響), 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), pp723-724, 2003.9
- 5) 竹中裕美, 大宮幸, 寺本隆幸: 低降伏点鋼ダンパーを用いた超高層建築の応答性状に関する研究—ダンパーの平面配置及び高さ方向分布の影響—, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), pp175-176, 2004.8
- 6) 石井正人, 太田弘俊, 多田有輝, 北村春幸, 和田章: 速度依存型制振部材付き架構の簡易モデル化手法, 日本建築学会構造系論文集, No.592, pp43-50, 2005.6
- 7) 石井正人, 笠井和彦: 多層制振構造の時刻歴解析に用いるせん断棒モデルの提案, 日本建築学会構造系論文集, Vol.75, No.647, pp103-112, 2010.1
- 8) Ishii, M. and T. Kouno: Dynamic Analysis of High-rise Building with Passive Dampers Using "BUILDING 3D DYNA", *Proceedings of 4th International Conference on Urban Earthquake Engineering*, pp.71-78, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan, March 5-6, 2007
- 9) 笠井和彦, 岩崎啓介: 様々な形式の制振構造における自由度縮約法と水平バネ系への変換法, 日本建築学会構造系論文集, No.605, pp37-46, 2006.7

## 付録. 1

(4)式におけるダンパーの塑性化部長さ  $L' = L/3$  ( $L$ : ダンパーの全長) の妥当性について示す。付図1に、2-5配置の30Hにおける、ダンパーの塑性化部長さを  $L/3$  としたダンパー量  $d\alpha_{y1} = 0.015$  の時の静的弾塑性解析による層せん断力  $Q$  と層間変形角  $R$  との関係を示す。なお、主架構は弾塑性とする。また、黒い○プロットは各層のダンパーの中でいずれかの部材が降伏点に達した時の値、白い○プロットは各層のいずれかの柱梁部材が全塑性モーメントに達した時の値、灰色の○プロットは時刻歴応答解析より得た最大層間変形角時のプロットを示す。付図1より、ダンパーと主架構との降伏点を比較すると、ダンパーは主架構よりも早くに塑性化し、早いもので主架構の降伏変形の1/4程度、遅いもので1/2.3程度で塑性化している。時刻歴応答解析の最大層間変形角時のプロットとダンパーおよび主架構の降伏点との関係に着目すると、1層でわずかに応答値が主架構の降伏点を上回るが、1層以外は弾性範囲に位置する。また、塑性化部の最大歪(塑性化部長さに対する時刻歴応答解析によるダンパーの軸変位との比の最大値)は、大きいもので0.6%, 1~20層で概ね0.4%であった。以上より、付図1に示したモデルにおいて、ダンパーの塑性化部長さを  $L/3$  ( $L$ : ダンパーの全長) とすることで、主架構の降伏変形の1/4~1/2.3程度で塑性化させられ、時刻歴応答解析時に架構をほぼ弾性に保つことが出来た。本モデルにおいて、ダンパーの塑性化部長さ  $L' = L/3$  ( $L$ : ダンパーの全長) は、ダンパーを有効に機能させられたため、妥当であ



ると考える。

## 付録. 2

図7(a),(b)のダンパー量の違いによる最大層せん断力および最大層間変形角において、44Hが他のモデルと異なる傾向を示した理由について、層間変形角の高さ方向分布に着目し記す。付図2,3に、2-5配置の37Hおよび44Hのダンパー量  $d\alpha_{y1} = 0.005 \sim 0.05$  における層間変形角の高さ方向分布を示す。付図2,3のそれぞれの(a),(b)には、 $d\alpha_{y1} = 0.005 \sim 0.025$  と  $d\alpha_{y1} = 0.03 \sim 0.05$  とに分けて示す。

はじめに、付図2の37Hについて考察する。付図2(a)より、ダンパー量を多くしていくと、概ね全層で応答低減されることがわかる。図中の○プロットは各モデルの最大値を表すが、最大値のみに着目すると、 $d\alpha_{y1} = 0.005 \sim 0.025$  の順に応答が低減される。付図2(b)より、ダンパー量を多くしていくと、上層の応答がわずかに大きくなり、下層の応答もわずかに低減される。次に、37Hと傾向の異なる付図3の44Hについて考察し、両者の比較を行う。付図3(a)より、 $d\alpha_{y1} = 0.01$  以降、ダンパー量を多くしていくと、上層の応答は低減されるが、2~5層の下層では応答が大きくなっている。最大値のみに着目すると、 $d\alpha_{y1} = 0.005, 0.01$  の順に応答は低減され、 $d\alpha_{y1} = 0.01, 0.015, 0.02$  の順に応答は大きくなる。付図3(b)より、ダンパー量を多くしていくと、付図3(a)とは逆に、上層の応答が大きくなり、下層の応答が低減される。最大値のみに着目すると、ほぼ一定である。以上より、 $d\alpha_{y1} = 0.005 \sim 0.025$  において、37Hがほぼ全層で応答低減されるに対し、44Hは上層で応答低減が見られたが下層で応答が大きくなる傾向があり、両者の最大値の傾向は異なる。また、 $d\alpha_{y1} = 0.03 \sim 0.05$  において、37Hは上層でわずかに応答が大きくなる傾向があるが、44Hは上層での応答が37Hよりもより大きくなる傾向が見られ、最大値がほぼ一定値をとる。これらダンパー量を増やしていくことで変動する高さ方向分布により、応答値の最大値を用いる図7(a),(b)の傾向が異なったのである。

